

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра Физики Земли

И. А. Миронова

**РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ**

Учебно-методическое пособие

Санкт Петербург

2018

Рецензенты: кандидат физ.-мат наук А. Л. Котиков,
кандидат физ.-мат наук Е. В. Москалева

Печатается по решению Ученого совета физического факультета
СПбГУ.

**И.А. Миронова РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ СПб. 2018**

В учебно-методическом пособии приводится схема расчета скорости ионизации высокоширотной/полярной атмосферы создаваемой выпавшими в атмосферу среднеэнергичными и высокоэнергичными электронами (от 30 кэВ до нескольких МэВ). Во введении учебно-методического пособия описываются основные источники и физические процессы, приводящие к вторжению энергичных частиц в атмосферу Земли из внешнего пространства. Приводится современное состояние исследований в данной области. В основной части учебно-методического пособия описываются основные формы спектров выпадающих электронов и виды функций отклика атмосферы на выпадения моноэнергичных единичных потоков электронов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	стр. 4
1. Современное состояние исследований	стр. 5-6
2. Расчет скорости ионизации атмосферы под воздействием энергичных частиц	стр. 6-7
3. Функция отклика атмосферы на высыпания моноэнергичных электронов	стр. 7-9
4. Формы спектров описывающие потоки энергичных частиц	стр. 10-12
Выводы	стр. 12
Список литературы	стр.13-14

Введение

В атмосферу Земли постоянно проникают энергичные частицы, в основном протоны и электроны, поступающие как от Солнца, так и из космического пространства. Эти частицы имеют общее название “высыпающиеся энергичные частицы”. Проникая в атмосферу Земли эти частицы участвуют в процессах ионизации атмосферы (Mironova et al., 2015).

В зависимости от энергии и интенсивности потока, высыпающиеся частицы проникают на различные глубины атмосферы. Большинство энергичных частиц приходят из космоса и известны как “космические лучи”. Они состоят в основном из протонов и являются наиболее энергичными частицами. Во время солнечных вспышек или корональных выбросов масс также происходит вбрасывание частиц в атмосферу, в основном протонов, с энергиями зависящими от мощности процессов происходящих на Солнце. В зависимости от геомагнитного обрезания, частицы космических лучей проникают на различные геомагнитные широты.

Солнечный ветер обеспечивает дополнительный источник высыпающихся энергичных частиц – в основном электронов, которые ускоряются/захватываются в магнитосфере Земли и являются менее энергичными по сравнению с протонами. Такие частицы вторгаются в атмосферу Земли из разных областей магнитосферы, и их высыпания обусловлены как условиями солнечного ветра, так и магнитосферными процессами. Множество процессов и их динамическая изменчивость приводят к высоким вариациям пространственных/временных потоков и энергетических спектров/распределений осаждающихся частиц. Данные энергичные частицы (электроны) менее энергичны, по сравнению с протонами космических лучей и проникают только в высокоширотную/полярную атмосферу Земли.

Данное учебно-методическое пособие сосредоточено на описании скорости ионизации высокоширотной/полярной атмосферы создаваемой высыпанными в атмосферу среднеэнергичными и высокоэнергичными электронами (от 30 кэВ до нескольких МэВ).

1. Современное состояние исследований

Первые работы по расчетам модельных скоростей ионизации атмосферы от моноэнергичных электронов, с учетом тормозного излучения, появились в конце 60х годов прошлого века. Это были аналитические модели функции отклика атмосферы на ионизацию, с отдельными расчетами и табличными данными по прямой скорости ионизации от частицы (электрона) определенной энергии и отдельно скорости ионизации от тормозного излучения (например, Rees et al., 1964). В работах обычно описывались моноэнергичные частицы от эВ до нескольких сотен кэВ. С развитием времени, параметризация модельных скоростей ионизации моноэнергичными электронами увеличилась в диапазоне энергий до 1 МэВ, но модели потеряли эффекты связанные с тормозным излучением (Fang et al. 2010; van de Kamp et al., 2016; Matthes et al., 2017). На данный момент существует только одна модель функции отклика атмосферы для высыпаний моноэнергичных электронов до десятков МэВ, с учетом тормозного излучения электронов и потерей энергий частиц за счет неупругих (ядерных) взаимодействий (Artamonov et al., 2016 и 2017).

Для расчета скорости ионизации атмосферы во время высыпания энергичных электронов необходимо использовать не только функцию отклика атмосферы для моноэнергичных электронов, но и информацию по спектрам выпавших в атмосферу электронов.

Точное описание пространственной и временной изменчивости скорости ионизации атмосферы, которая описывается в основном выпадающими в атмосферу частицами, а точнее их спектрами, является одной из основных проблем, на современном этапе исследований. Например, наземные измерения с помощью радаров или балонные измерения (Makhmutov et al., 2016) могут содержать обзоры временных вариаций или суперпозицию пространственных и временных вариаций выпавших магнитосферных частиц, в то же время вопрос о спутниковых измерениях таких частиц до сих пор открыт (Imhof and Smith 1965; Nesse Tyssøy et al., 2016). На основе спутников, в основном POES - NOAA уже существуют современные попытки описания спектров проникающих в атмосферу среднеэнергичных и высокоэнергичных электронов (Nesse Tyssøy et al., 2016), а иногда и скоростей ионизации, однако большинство из этих попыток

имеют значительные допущения в виде диапазонов энергий. Одна из современных моделей скоростей ионизации атмосферы, модель AIMOS (Wissing и Kallenrode, 2009), включает в себя магнитосферные электроны и протоны, солнечные протоны и альфа частицы, но не учитывает диапазон энергий от средних до высокоэнергичных электронов.

Данное учебно-методическое пособие как раз направлено на описание скорости ионизации атмосферы во время высыпаний средне и высокоэнергичных электронов.

2. Расчет скорости ионизации атмосферы под воздействием энергичных частиц

Для расчета скорости ионизации атмосферы, на данной высоте h , отсыпающихся в атмосферу энергичных частиц (электроны, в нашем случае) необходимо учитывать функцию отклика атмосферы на высыпания моноэнергичных электронов $Y(E, h)$ и спектр потока частиц $F(E)$. При этом необходимо знать плотность атмосферы на данной высоте $g(h)$ и функцию отклика атмосферы на данной глубине x ($гp\ cm^{-2}$), так как $Y(E, h) = Y(E, x) g(h)$. Формула (1) описывает расчет скорости ионизации атмосферы $I(h)$ (*ионные пары в $cm^{-3}сек^{-1}$*) на определенной высоте h , по всем энергиямсыпающихся в атмосферу электронов. $F(E)$ - поток электронов ($кэВ^{-1}cm^{-2}сек^{-1}$) с кинетической энергией (E) на верхней границе атмосферы.

$$I(h) = \int Y(E, h) F(E) dE \quad (1)$$

Функция отклика $Y(E, x)$ (*ионные пары в $cm^2\ гp^{-1}$*) – число ионных пар, индуцированных выпавшим в атмосферу одним электроном с заданной кинетической энергией (E) или единичным потоком моноэнергичных электронов

с заданной кинетической энергией (E), на заданной атмосферной глубине x ($гр\text{ см}^{-2}$).

Функции отклика позволяют вычислить скорость ионизации атмосферы $I(h)$, вызванную энергетическим осадчением электронов с любым угловым распределением на верхней границе атмосферы.

В следующих двух главах будут отдельно рассмотрены примеры функций отклика атмосферы на выпадения моноэнергичных единичных потоков электронов и формы спектров выпадающих в атмосферу электронов.

3. Функция отклика атмосферы на выпадения моноэнергичных электронов

Взаимодействие электронов (с энергиями от 30 keV до нескольких MeV) с атмосферой моделируется с использованием программы PLANETOCOSMICS/GEANT 4 (Desorgher et al., 2005). Для численных расчетов атмосферной плотности используется модель NRLMSISE-00 (Picone et.al., 2002). Функция отклика атмосферы на выпадения моноэнергичных электронов определяется по формуле (2):

$$Y(E, x) = \partial E(x, E) / E_{ion} \partial x \quad (2)$$

где ∂E - энергетическое описание выпавшихся электронов в атмосферном слое ∂x на глубине x , усредненное для первичной частицы с кинетической энергией E , а $E_{ion} = 35$ эВ - средняя энергия, необходимая для образования ионной пары в воздухе (Porter et al., 1976). Вычисления проводятся в энергетическом диапазоне осаждающихся электронов между 30 кэВ и несколькими МэВ.

Пример рассчитанных функций отклика атмосферы на выпадения электронов с энергиями от 100 кэВ до 10 МэВ приведен в Таблице 1. В таблице приведены значения функций отклика $Y(E,h)$ на высоте h (км), а не на глубине атмосферы x (гр см⁻²).

Таблица 1: Табличные значения рассчитанных функций отклика атмосферы $Y(E,h)$ для скоростей ионизации (ионные пары в см⁻³сек⁻¹) атмосферы на высоте h (км). Функции отклика соответствуют моноэнергичными единичным потокам электронов с энергиями от 100 кэВ до 10 МэВ.

h, км	0,1 МэВ	0,5 МэВ	1 МэВ	5 МэВ	10 МэВ
2,21E+01	2,85E-09	5,29E-07	4,08E-06	6,42E-04	3,89E-03
2,61E+01	2,15E-08	2,45E-06	1,49E-05	1,14E-03	5,37E-03
3,01E+01	6,75E-08	5,03E-06	2,73E-05	1,31E-03	5,68E-03
3,41E+01	1,16E-07	6,18E-06	3,11E-05	1,14E-03	2,19E-02
3,80E+01	1,29E-07	5,65E-06	2,67E-05	6,31E-03	5,37E-02
4,20E+01	1,21E-07	4,71E-06	2,12E-05	2,79E-02	7,61E-02
4,60E+01	1,05E-07	3,67E-06	1,58E-05	4,80E-02	7,92E-02
4,99E+01	8,65E-08	2,80E-06	1,17E-05	5,16E-02	6,54E-02
5,38E+01	6,73E-08	2,05E-06	2,16E-04	4,27E-02	4,73E-02
5,77E+01	4,64E-08	1,37E-06	5,85E-03	3,03E-02	3,16E-02
6,19E+01	3,22E-08	2,59E-04	1,59E-02	1,94E-02	1,99E-02
6,63E+01	2,18E-08	2,11E-03	1,52E-02	1,15E-02	1,19E-02
7,09E+01	1,33E-08	3,16E-03	9,51E-03	6,52E-03	6,71E-03
7,57E+01	7,92E-09	2,81E-03	4,98E-03	3,54E-03	3,65E-03
8,06E+01	2,99E-05	1,85E-03	2,49E-03	1,89E-03	1,95E-03
8,55E+01	5,63E-04	1,06E-03	1,26E-03	1,01E-03	1,05E-03
9,03E+01	8,85E-04	5,83E-04	6,49E-04	5,40E-04	5,62E-04
9,51E+01	6,80E-04	3,13E-04	3,34E-04	2,85E-04	2,97E-04
1,00E+02	3,98E-04	1,60E-04	1,66E-04	1,44E-04	1,50E-04
1,06E+02	2,00E-04	7,78E-05	7,95E-05	6,94E-05	7,23E-05
1,12E+02	9,43E-05	3,69E-05	3,75E-05	3,28E-05	3,43E-05
1,17E+02	4,55E-05	1,82E-05	1,84E-05	1,61E-05	1,69E-05
1,22E+02	2,38E-05	9,68E-06	9,83E-06	8,58E-06	9,01E-06
1,26E+02	1,37E-05	5,68E-06	5,78E-06	5,04E-06	5,30E-06
1,29E+02	8,69E-06	3,65E-06	3,73E-06	3,26E-06	3,43E-06
1,32E+02	5,97E-06	2,54E-06	2,62E-06	2,29E-06	2,40E-06
1,34E+02	4,35E-06	1,88E-06	1,95E-06	1,70E-06	1,78E-06
1,36E+02	3,30E-06	1,44E-06	1,51E-06	1,32E-06	1,38E-06
1,38E+02	2,58E-06	1,14E-06	1,20E-06	1,05E-06	1,10E-06
1,40E+02	2,06E-06	9,28E-07	9,77E-07	8,59E-07	8,98E-07
1,41E+02	1,68E-06	7,66E-07	8,08E-07	7,12E-07	7,44E-07

1,42E+02	1,40E-06	6,41E-07	6,77E-07	5,98E-07	6,25E-07
1,44E+02	1,17E-06	5,43E-07	5,73E-07	5,07E-07	5,30E-07
1,45E+02	9,96E-07	4,64E-07	4,90E-07	4,34E-07	4,54E-07
1,46E+02	8,53E-07	3,99E-07	4,22E-07	3,74E-07	3,91E-07
1,47E+02	7,36E-07	3,46E-07	3,66E-07	3,25E-07	3,39E-07
1,48E+02	6,40E-07	3,02E-07	3,19E-07	2,84E-07	2,96E-07
1,49E+02	5,59E-07	2,64E-07	2,80E-07	2,49E-07	2,60E-07
1,50E+02	4,90E-07	2,33E-07	2,46E-07	2,19E-07	2,29E-07
1,51E+02	4,32E-07	2,05E-07	2,18E-07	1,94E-07	2,02E-07

На Рис.1 приведено наглядное изображение рассчитанных функций отклика атмосферы на осадения электронов с энергиями от 100 кэВ до 10 МэВ. Численные расчеты к данному рисунку приведены в Таблице 1.

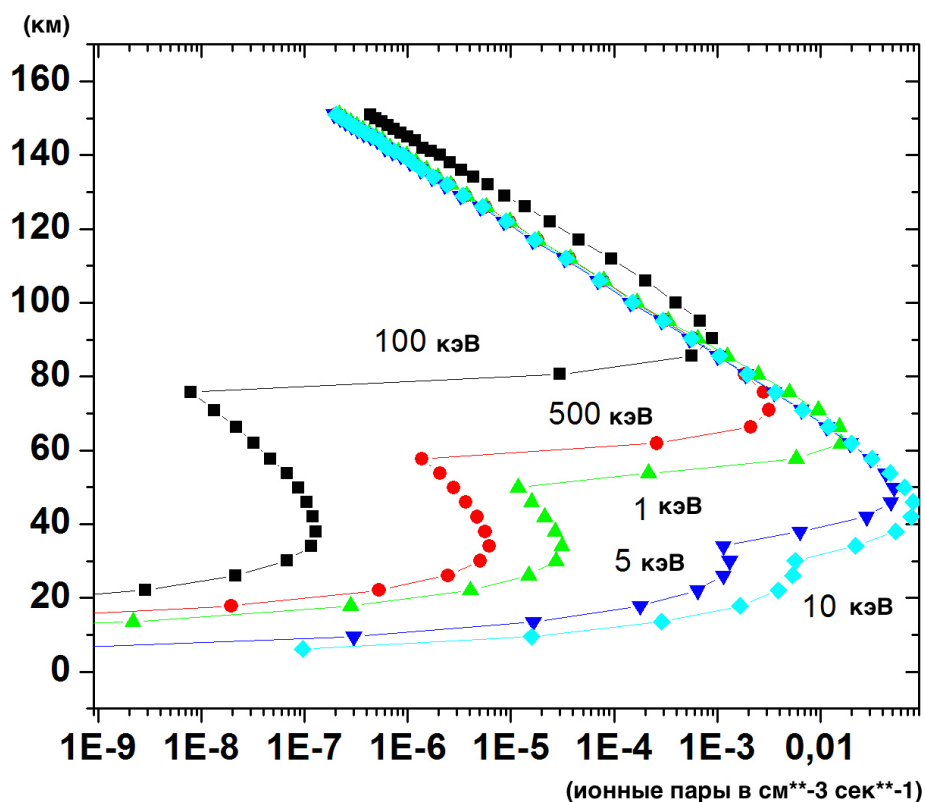


Рис.1 Профили функций отклика атмосферы на выпадения изотропного могоэнергичного единичного потока электронов. Рассмотрены отдельно единичные потоки электронов от 100 кэВ до 10 МэВ.

4. Формы спектров описывающие потоки энергичных частиц

Для расчета реальных скоростей ионизации атмосферы под воздействием выпадающих частиц необходимо знать не только функции отклика атмосферы на выпадения моноэнергичных единичных потоков частиц, но и знать точное описание спектра потока частиц $F(E)$.

Пространственная и временная изменчивость скорости ионизации атмосферы в основном зависит от энергий и интенсивности потоков выпадающих в атмосферу частиц, а точнее их спектрами. Многочисленные измерения потоков энергичных частиц позволили определить основные функции или формы спектров потоков электронов. В настоящее время широко используются предположения о спектрах частиц, основанные на различных функциях, например таких как степенной закон и др.. Ниже будут приведены различные функции электронных спектров, а также различные возможные реконструкции спектров.

Экспоненциальный энергетический спектр

Как правило, функция экспоненциального закона энергетических спектров используется для описания данных с аэростатных и баллонных измерений (Makhmutov et al., 2016; Millan et al., 2007). Аппроксимация данных позволяет оценить спектры поглощения фотонов, зарегистрированные в атмосфере. В этом случае форма спектра по энергиям частиц использует функцию экспоненциального закона:

$$Fe(E) = A1 * \exp(-E / E_0) \quad (3)$$

где $Fe(E)$ - дифференциальный изотропный поток осаждающих электронов с энергией E . E_0 - характерная энергия осаждения электронов в кэВ. $A1$ является параметром общего потока осаждающей энергии ($\text{кэВ}^{-1} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$).

Максвелловский энергетический спектр

Максвелловский тип энергетического спектра хорошо описывает дифференциальный вертикальный поток частиц $F_M(E)$ ($\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$). Данная форма потока получена на основе наблюдений со спутников и наземных измерений (Mori et al., 2004; Fang et al., 2010).

Максвелловское распределение энергии определяется формулой (4):

$$F_M(E) = A_2 * E * \exp(-E / E_0) \quad (4)$$

где E_0 - характерная энергия (в кэВ), A_2 - коэффициент, эквивалентный $Q_0/2E_0^3$. Q_0 - суммарный поток энергии осаждения ($\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$). Основное отличие между предыдущим типом спектра, представленными уравнением (3) и спектром в виде уравнения (4), состоит в том, что энергия E интегрального потока осаждающихся электронов умножается на показатель степени.

Энергетическое спектральное распределение

В общем случае степенная функция спектров используется для подбора спутниковых наблюдений солнечных протонов (Codrescu et al., 1997; Wissing and Kallenrode, 2009) и электронов средних энергий (30 - 1000 кэВ) (van de Kamp et al., 2016). Функция степенного закона представлена в виде формулы (5):

$$F_s(E) = A_3 * (E / E_0)^k \quad (5)$$

$F_s(E)$ - степенной энергетический спектр ($\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{sr}^{-1}$), A_3 –параметер потока высыпающихся электронов, k - спектральный индекс. $E_0 = 1 \text{ кэВ}$. Значение энергии нижнего предела электронного потока составляет 30 кэВ , а верхний энергетический предел равен 1 МэВ (van de Kamp et al., 2016).

Обобщенное Лоренцево или к-спектральное распределение

Если функция распределения уменьшается по сравнению с распределением потока частиц представленным степенным законом, то энергии частиц осаждения могут быть представлены в виде к-спектрального распределения (Fang et al., 2010).

$$F_k(E) = A_4 * E * (1 + E / kE_0)^{-(k+1)} \quad (6)$$

Здесь $E_0 = 1$ кэВ, A_4 – определяется как $(Q_0/2E_0^3)/((k-1)(k-2)/k^2)$. Q_0 – суммарный поток энергии осаждения ($\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$). k – спектральный индекс. к-распределение дифференциального энергетического спектра потока $F_k(E)$ ($\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), связано с изотропным случаем осаждения/высыпания электронов, и совпадает со степенным спектральным распределением. Прямые спутниковые спектральные измерения можно аппроксимировать, используя одну из спектральных функций распределения. В связи с этим нижний и верхний энергетический предел энергий частиц 30 кэВ и 1 МэВ, соответственно.

Выводы

Основные формулы и понятия, приведенные в данном учебно-методическом пособии, позволяют рассчитать скорости ионизации атмосферы во время высыпаний средне и высокоэнергичных электронов.

Основная формула, используемая для расчетов скоростей ионизации атмосферы, приведена в уравнении (1). Для того чтобы численно получить значение скорости ионизации атмосферы $I(h)$, во время высыпаний энергичных частиц на определенной высоте (h) нужно использовать табличные значения функций отклика атмосферы $Y(E, h)$, приведенные в Таблице 1. Пределы интегрирования по энергиям частиц, в формуле (1), берутся в зависимости от пределов энергий, полученных во время измерений потоков электронов. Значения реальных потоков электронов берутся из наблюдений и аппроксимируются наиболее подходящей формой спектров, приведенных в уравнениях (3-6).

В качестве закрепления полученных знаний, в рамках учебного курса, предлагается рассчитать высотный профиль скорости ионизации атмосферы во время высыпаний энергичных электронов, в определенном диапазоне энергий, воспользовавшись формулой расчета скорости ионизации атмосферы (формула (1)) и таблицей описывающей высотный профиль функции отклика атмосферы (таблица 1), которые приведены в данном учебно-методическом пособии. Ссылки, на данные по потоку электронов, даются отдельно. Пределы интегрирования выбираются согласно энергиям частиц в потоке. Аппроксимация данных проводится согласно формам спектров, которые приведены в данном учебно-методическом пособии (формулы (3-6)).

Список литературы

Artamonov, A. A., Mishev, A. L., Usoskin, I. G., Model CRAC:EPH for atmospheric ionization due to precipitating electrons: Yield function and applications. *J. Geophys. Res.* 121, 1736–1743, 2016.

Artamonov, A., I. Mironova, G. Kovaltsov, A. Mishev, E. Plotnikov, and N. Konstantinova, Calculation of atmospheric ionization induced by relativistic electrons with non - vertical precipitation: update of model CRAC:EPH, *Adv. Space Res.*, 59(9), 2295 – 2300, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.019>, 2017.

Codrescu, M. V., Fuller-Rowell, T. J., Roble, R. G., and Evans, D. S.: Medium energy particle precipitation influences on the mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 19 977–19 988, doi:10.1029/97JA01728, 1997.

Desorgher L., E. Flückiger, M. Gurtner, M. Moser and R. Bütikofer, A GEANT 4 code for computing the interaction of cosmic rays with the Earth's atmosphere, *International Journal of Modern Physics*, A 20, no. A11 6802–6804, 2005.

Imhof, W. L., and R. V. Smith, Energy spectrum of electrons at low altitudes, *J. Geophys. Res.*, 70(9), 2129–2134, doi:10.1029/JZ070i009p02129, 1965.

Fang, X., Randall, C. E., Lummerzheim, D., Wang, W., Lu, G., Solomon, S. C., and Frahm, R. A.: Parameterization of monoenergetic electron impact ionization, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22106, <https://doi.org/10.1029/2010GL045406>, 2010.

van de Kamp, M., A. Seppälä, M. A. Clilverd, C. J. Rodger, P. T. Verronen, and I. C. Whittaker A model providing long-term data sets of energetic electron precipitation during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2015JD024212, 2015JD024212, 2016.

Makhmutov, V., G. Bazilevskaya, Y. Stozhkov, A. Svirzhevskaya, and N. Svirzhevsky

(2016), Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **149**, 258 – 276, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.006>, 2016.

Matthes, K., B. Funke, M. E. Andersson, L. Barnard, J. Beer, P. Charbonneau, M. A. Clilverd, T. Dudok de Wit, M. Haberreiter, A. Hendry, C. H. Jackman, M. Kretzschmar, T. Kruschke, M. Kunze, U. Langematz, D. R. Marsh, A. C. Maycock, S. Misios, C. J. Rodger, A. A. Scaife, A. Seppälä, M. Shangguan, M. Sinnhuber, K. Tourpali, I. Usoskin, M. van de Kamp, P. T. Verronen, and S. Versick, Solar forcing for CMIP6 (v3.2), *Geos. Model Dev.*, **10**, 2247–2302, doi:10.5194/gmd-10-2247-2017, 2017.

Millan, R. M., Lin, R. P., Smith, D. M., and McCarthy, M. P.: Observation of relativistic electron precipitation during a rapid decrease of trapped relativistic electron flux, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L10101, doi:10.1029/2006GL028653, 2007.

Mironova, I.A., K.L. Aplin, F. Arnold, G.A. Bazilevskaya, R.G. Harrison, A.A. Krivolutsy, K.A. Nicoll, E.V. Rozanov, E. Turunen, I.G. Usoskin, Energetic particle influence on the Earth's Atmosphere, *Space. Sci. Rev.*, **194**, 1-96, doi:10.1007/s11214-015-0185-4, 2015.

Mori, H., Ishii, M., Murayama, Y., Kubota, M., Sakanoi, K., Yamamoto, M., Monzen, Y., Lummerzheim, D., and Watkins, B.: Energy distribution of precipitating electrons estimated from optical and cosmic noise absorption measurements, *Annal. Geoph.*, **22**, 1613–1622, doi:10.5194/angeo-22-1613-2004, 2004.

Nesse Tyssøy, H., M. I. Sandanger, L.-K. G. Ødegaard, J. Stadsnes, A. Aasnes, and A. E. , Zawedde, Energetic electron precipitation into the middle atmosphere – Constructing the loss cone fluxes from MEPED POES, *J. Geophys. Res.*, **121**, 5693–5707, doi: 10.1002/2016JA022752, 2016.

Picone J., A. Hedin, D. Drob and A. Aikin, NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **107**, no. A12 1468, 2002.

Porter, C. Jackman and A. Green, Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air, *The Journal of Chemical Physics*, **65**, no. 1 154–167, 1976.

Rees, M. H., Ionization in the Earth's atmosphere by aurorally associated Bremsstrahlung X-rays, *Planetary and Space Science*, **12**, 1093–1108, doi:10.1016/0032-0633(64)90084-4, 1964 .

Wissing J.M. and Kallenrode M.B., Atmospheric Ionization Module Osnabru.ck (AIMOS): A 3-D model to determine atmospheric ionization by energetic charged particles from different populations. *J Geophys Res* 2009; **114**, A06104, doi: 10.1029/2008JA013884, 2016.